昆 虫 学 报 *Acta Entomologica Sinica*, June 2008, 51(6):569 – 574 ISSN 0454-6296

斜纹夜蛾幼虫对食物中重金属 Ni^{2+} 的积累与排泄

孙虹霞[1,#],夏 嫱[1,2,#],周 强[1],张古忍[1,*]

(1. 中山大学有害生物控制与资源利用国家重点实验室/昆虫学研究所,广州 510275;
2. 遵义医学院珠海校区,广东珠海 519041)

摘要:为明确食物中重金属离子在昆虫体内的分布和转移情况,本文采用等离子体原子发射光谱仪检测了植食性昆虫斜纹夜蛾 *Spodoptera litura* Fabricius 连续 3 个世代 6 龄幼虫对食物中过量 Ni^{2+} 的排泄和积累情况。结果表明:大部分 Ni^{2+} 可通过粪便排出体外;沉积在体内的 Ni^{2+} 主要积累在中肠,部分 Ni^{2+} 可通过中肠上皮细胞基底膜进入血淋巴,经由血淋巴的转运作用积累在脂肪体和表皮等组织中。6 龄幼虫不同组织中所积累 Ni^{2+} 的含量为中肠 > 脂肪体 > 表皮,且不同组织和粪便中的 Ni^{2+} 都随饲料中 Ni^{2+} 浓度的增加而增加,并存在显著的剂量-反应关系。研究结果可为进一步研究过量 Ni^{2+} 对斜纹夜蛾幼虫的生长发育和繁殖的影响,以及斜纹夜蛾幼虫不同组织对 Ni^{2+} 的解毒能力等提供一定依据。

关键词:斜纹夜蛾;重金属;镍 排泄;积累;生长发育;繁殖

中图分类号:Q966 **文献标识码**:A **文章编号**:0454-6296(2008)06-0569-06

Accumulation and excretion of nickel in *Spodoptera litura* Fabricius larvae fed on diets with Ni^{2+}

SUN Hong-Xia[1], XIA Qiang[1,2], ZHOU Qiang[1], ZHANG Gu-Ren[1,*] (1. State Key Laboratory for Biological Control & Institute of Entomology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 2. Zhuhai Campus, Zunyi Medical College, Zhuhai, Guangdong 519041, China)

Abstract: To study the distribution and transfer of heavy metal in insects, nickel amounts in the faeces and tissues of the 6th instar *Spodoptera litura* Fabricius larvae fed on artificial diets amended with different concentrations of nickel for 3 generations were detected by Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometer (ICP-AES). The results showed that majority of nickel in diets could be excreted through faeces. Nickle uptaken by *S. litura* larvae was primarily stored in the midgut of larvae, and some of nickel could enter the hemolymph via intestine and then be transferred to fat body and cuticle. Nickel accumulated in the midgut was more than those in the fat body and the cuticle in which nickel accumulation was the lowest. The results also indicated that nickel in faeces and different tissues of *S. litura* larvae within a generation increased with the increase of nickel concentrations in the treated diets and showed significant dose-dependent relationship with the nickel concentrations in artificial diets. The results might provide insight into the effects of nickel contamination on development and reproduction of *S. litura*, as well as the detoxification of *S. litura* to heavy metal nickel.

Key words: *Spodoptera litura*; heavy metal; nickel; excretion; accumulation; growth and development; reproduction

污染环境的重金属离子可通过动物的表皮、呼吸和摄食等途径进入食物链并在不同营养级中转移

基金项目:国家重点基础研究发展规划项目(2006CB102001);国家自然科学基金资助项目(30771458);国家教育部博士点专项基金(20070558029);广东省基础研究团队项目(E039254)

作者简介:孙虹霞,女,1978 年 12 月生,博士研究生,从事昆虫生物技术研究,E-mail:sunhu9951@sina.com;夏嫱,女,1973 年 2 月生,博士,从事昆虫学研究,E-mail:xiaqiang1973@126.com

# 并列第一作者 Author with equal contributions

* 通讯作者 Author for correspondence, E-mail:zhanggr@mail.sysu.edu.cn

收稿日期 Received:2007-10-23;接受日期 Accepted:2008-04-30

和积累,最终威胁人类的身体健康。重金属在水生动物体内的迁移途径,一是经过鳃不断吸收溶解在水中的重金属离子,然后通过血液输送到体内的各个部位,或累积在表面细胞之中;二是水体或残留在饵料中的重金属通过摄食进入消化道,进而积累在不同部位。研究表明,进入体内的重金属可积累在鱼类的肾脏、肝脏、鳃和鳞中(刘丹赤和邵长明,2007),也可沉积在贝类的鳃、外套膜和内脏中(励建荣等,2007),而虾的内脏和头部是积累的主要部位(李来好等,2006)。就陆生节肢动物尤其是昆虫而言,取食是重金属进入体内的一条重要途径,摄入的过量重金属可沉积在具消化、存储或分泌功能的器官中(Hopkin,1990;Schofield *et al*.,1997;Ballen-Dufrancais,2002)。然而,不同生物对重金属的积累能力有所不同,而同种生物不同组织和不同器官对重金属的积累程度也存在较大的差异。

Ni^{2+} 是常见重金属污染元素之一,可在龙螯虾 *Patella caerulea*(L.)(Türkmen *et al*.,2005)、亚比虾 *Cherax destructor*(Khan and Nugegoda,2003)和海湾蟾蜍鱼 *Opsanus beta*(Goode & Bean)(Pane *et al*.,2006)等水生生物,以及毛翅目 *Stenopsyche marmorata*(Navas)(Tochimoto *et al*.,2003)、鞘翅目 *Chrysolina pardalina*(Fabricius)(Zvereva *et al*.,2003)和鳞翅目舞毒蛾 *Lymantria dispar* L.(Bagatto and Shorthouse,1996)、拟紫毛顶蛾 *Eriocrania semipurpurella*(Stephens)(Kozlov *et al*.,2000)等昆虫体内积累。然而,相对于 Cu^{2+}、Zn^{2+}、Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 等常见的重金属,Ni^{2+} 在陆生生物尤其是昆虫体内积累特点的研究则较少。

斜纹夜蛾 *Spodoptera litura* Fabricius 属鳞翅目(Lepidoptera)夜蛾科(Noctuidae),是重要的农业害虫。在野外和实验室条件下,重金属尤其是 Ni^{2+} 对其影响的研究还未见报道。本文以斜纹夜蛾幼虫为材料,通过在斜纹夜蛾幼虫人工饲料中添加不同浓度的 Ni^{2+},研究了斜纹夜蛾幼虫经 Ni^{2+} 连续胁迫 3 代后,斜纹夜蛾 6 龄幼虫对食物中 Ni^{2+} 的排泄和积累情况,为全面了解农田重金属污染的生态学效应提供一定的依据,同时也为监测野外重金属污染对斜纹夜蛾种群的影响提供一定的基础。

1 材料和方法

1.1 斜纹夜蛾幼虫的饲养

斜纹夜蛾系中山大学昆虫学研究所养虫室人工饲料饲养。在人工饲料中添加不同浓度的 Ni^{2+},并以此连续 3 代饲喂斜纹夜蛾幼虫。以第 1 代幼虫化蛹后,羽化成虫所产的卵作为第 2 代虫源,第 3 代依此类推,每天更换饲料并连续胁迫 3 代。不添加 Ni^{2+} 的饲料为对照。所有的昆虫均饲养在 26 ± 1℃,16L:8D,RH 75% ± 5% 条件下。

1.2 仪器与试剂

IRIS Advantage(HR)等离子体原子发射光谱仪(ICP)购自美国 Thermo Jarrell Ash Corporation。

1.3 Ni^{2+} 的胁迫处理

根据 Garrido 等(2005)的报道,当蔬菜中的 Ni^{2+} 含量达到 10 ~ 30 mg/kg 时,就会对蔬菜产生毒害作用。鉴于此,将 $NiCl_2$ 添加在人工饲料中,使 Ni^{2+} 终剂量分别为 1,5,10,20 和 40 mg/kg。以不添加 $NiCl_2$ 饲料饲养的斜纹夜蛾为对照。

1.4 组织材料的收集

观测斜纹夜蛾生长状况,在其进入 6 龄末的前一天晚上清洗养虫盒并更换饲料,12 h 后收集幼虫粪便。双蒸水清洗收集粪便后的 60 头幼虫,用昆虫针刺其第 3 腹足取血淋巴,然后解剖收集中肠、脂肪体和表皮,并再次用双蒸水清洗。将收集的粪便、中肠、脂肪体和表皮置于规格为 30 mm × 50 mm 称量瓶中备用。

1.5 Ni^{2+} 浓度的检测

将同一世代内收集到的不同组织和粪便置于 120℃烘箱干燥 4 h 后,立即放入干燥器中冷却。称量 0.1 g 干燥并混匀的组织和粪便,并量取 2 mL 血淋巴分别进行消化。先将材料放入 50 mL 安培瓶中,再加入 6 mL 浓硝酸,置于电炉上消化。待棕色气体消失冒白烟后移开安培瓶,自然冷却后加入 1 mL 高氯酸继续消化。待棕色气体消失,得到透明溶液后取下安培瓶,冷却后用定性滤纸过滤,去离子水定容至 10 mL。以浓硝酸和高氯酸为空白对照,用等离子体原子发射光谱仪测定各个样品的 Ni^{2+} 含量(mg/kg 或 mg/L),每处理 3 个重复。

1.6 数据分析

重金属 Ni^{2+} 在斜纹夜蛾 6 龄幼虫不同组织中和粪便中的浓度按如下公式计算:

$$Ni^{2+}\ 浓度(mg/kg)/(mg/L) = C \times 10^4/W$$

其中 C 为 ICP 测得的浓度(mg/L),W 表示所称取样品的干重(kg)或血淋巴的体积(L)。

粪便和组织中的 Ni^{2+} 浓度数据经 $\log_{10}(x+1)$ 转换后,采用 SAS 软件包进行方差分析,并进行多重比较,以阐明对照与处理间以及各个处理间差异的

显著性。对不同处理中的重金属浓度与斜纹夜蛾幼虫饲料中的 Ni^{2+} 浓度进行线性回归分析，以了解组织中的含量与饲料中离子浓度之间的关系。

2 结果和分析

2.1 斜纹夜蛾对食物中重金属 Ni^{2+} 的排泄

取食含有不同 Ni^{2+} 剂量饲料的斜纹夜蛾不同世代的幼虫粪便中 Ni^{2+} 浓度的变化见表 1。粪便中的 Ni^{2+} 浓度都随胁迫世代数的延长而增加，且在 5，10 和 20 mg/kg Ni^{2+} 胁迫下，第 3 代虫体粪便中 Ni^{2+} 浓度显著高于第 1 代中的浓度。粪便中的 Ni^{2+} 浓度也随饲料中 Ni^{2+} 浓度的增加而增加，并呈现显著的剂量-反应关系（第 1，2 和 3 代的剂量-反应回归方程分别为 $y = 6.2403x + 2.1589$，$R^2 = 0.9918$；$y = 6.607x + 9.2616$，$R^2 = 0.9996$；$y = 6.9541x + 12.687$，$R^2 = 0.9971$），同时，粪便中的 Ni^{2+} 在同一世代不同处理间都存在显著的差异性。

2.2 斜纹夜蛾对食物中重金属 Ni^{2+} 的积累

同一世代内，中肠内的 Ni^{2+} 浓度除受 5 和 10 mg/kg Ni^{2+} 胁迫的第 1 代幼虫之间以及受 1 和 5 mg/kg Ni^{2+} 胁迫的第 2 和 3 代幼虫之间不存在显著差异外，其他各处理虫体中肠中的 Ni^{2+} 浓度都存在显著差异性。在 10 mg/kg Ni^{2+} 胁迫下，第 3 代幼虫中肠内的 Ni^{2+} 浓度显著高于第 1 代的浓度，而在高浓度 Ni^{2+}（20 和 40 mg/kg）胁迫下，第 3 代幼虫中肠内 Ni^{2+} 的浓度都显著高于第 1 和 2 代中的浓度（表 2）。

表 1　连续 3 代幼虫取食含不同剂量 Ni^{2+} 的人工饲料后斜纹夜蛾 6 龄幼虫粪便中的 Ni^{2+} 含量（mg/kg）

Table 1　Ni^{2+} concentration (mg/kg) in faeces of the 6th instar larvae of *S. litura* fed on diets with different concentrations of nickel for 3 generations

饲料中 Ni^{2+} 浓度 Nickel doses in diets (mg/kg)	第 1 代 1st generation	第 2 代 2nd generation	第 3 代 3rd generation
0	8.117 ± 1.159 Ae	8.567 ± 0.088 Ae	9.033 ± 0.788 Ae
1	14.633 ± 2.196 Ae	14.970 ± 0.521 Ae	16.700 ± 0.950 Ae
5	32.800 ± 0.808 Bd	40.933 ± 3.298 Bd	54.030 ± 5.084 Ad
10	47.700 ± 2.991 Bc	76.733 ± 8.690 Ac	77.900 ± 3.553 Ac
20	129.167 ± 5.145 Bb	144.833 ± 7.470 ABb	159.800 ± 6.332 Ab
40	254.800 ± 7.724 Aa	271.667 ± 13.878 Aa	287.170 ± 7.818 Aa

同一行平均数后不同的大写字母表示不同世代间存在显著差异性；同一列平均数后不同的小写字母表示同一世代不同处理间的差异显著（$P < 0.05$）。下同。Different capital letters in the same row indicate that means are significant different among different generations, while different small letters in the same column indicate that means are significant different among the different treatments ($P < 0.05$). The same below.

表 2　连续 3 代幼虫取食含不同剂量 Ni^{2+} 的人工饲料后斜纹夜蛾 6 龄幼虫中肠内的 Ni^{2+} 含量（mg/kg）

Table 2　Ni^{2+} concentration (mg/kg) in the midgut of the 6th instar larvae of *S. litura* fed on diets with different concentrations of nickel for 3 generations

饲料中 Ni^{2+} 浓度 Nickel doses in diets (mg/kg)	第 1 代 1st generation	第 2 代 2nd generation	第 3 代 3rd generation
0	1.337 ± 0.086 Ae	0.970 ± 0.200 Ae	1.867 ± 0.578 Ae
1	5.487 ± 0.706 Ad	6.167 ± 0.426 Ad	7.700 ± 0.416 Ad
5	7.500 ± 0.321 Ac	8.967 ± 0.801 Ad	9.500 ± 1.400 Ad
10	8.567 ± 0.536 Bc	10.500 ± 0.470 ABc	15.500 ± 2.569 Ac
20	17.567 ± 0.960 Bb	19.600 ± 0.980 Bb	24.267 ± 1.1837 Ab
40	27.933 ± 2.933 Ba	30.900 ± 1.130 Ba	37.767 ± 0.467 Aa

6 龄幼虫脂肪体中的 Ni^{2+} 浓度在高浓度（10，20，40 mg/kg）处理之间都存在显著差异性，但只显著大于第 2 代受低浓度 Ni^{2+}（1 和 5 mg/kg）胁迫虫体中的 Ni^{2+} 含量。此外，在较高浓度 Ni^{2+}（20 和 40 mg/kg）胁迫下，第 3 代 6 龄幼虫脂肪体中的 Ni^{2+} 浓度都显著高于第 1 代虫体中的浓度（表 3）。

表皮中的 Ni^{2+} 浓度在高浓度 Ni^{2+}（10，20，40 mg/kg）胁迫的虫体中也存在显著差异性。除第 3 代受 5 mg/kg Ni^{2+} 胁迫虫体外，连续 3 个世代对照和低浓度 Ni^{2+}（1 和 5 mg/kg）胁迫虫体的表皮中均未检测到 Ni^{2+} 的存在。在高浓度 Ni^{2+} 胁迫下，虫体中的 Ni^{2+} 浓度均随胁迫时间的增加而增加，但虫体中的 Ni^{2+} 浓度在不同世代间都不存在显著差异（表 4）。

表 3 连续 3 代幼虫取食含不同剂量 Ni^{2+} 的人工饲料后斜纹夜蛾 6 龄幼虫脂肪体内的 Ni^{2+} 含量(mg/kg)

Table 3 Ni^{2+} concentration (mg/kg) in the fat body of the 6th instar larvae of *S. litura* fed on diets with different concentrations of nickel for 3 generations

饲料中 Ni^{2+} 浓度 Nickel doses in diets (mg/kg)	第 1 代 1st generation	第 2 代 2nd generation	第 3 代 3rd generation
0	0.600 ± 0.058 Ad	0.633 ± 0.067 Ad	0.567 ± 0.088 Ad
1	0.867 ± 0.120 Ad	0.967 ± 0.176 Ad	1.267 ± 0.260 Ad
5	1.967 ± 0.176 Ac	2.333 ± 0.338 Ad	2.933 ± 0.260 Ac
10	2.267 ± 0.273 Ac	2.97 ± 0.200 Ac	3.533 ± 0.497 Ac
20	6.767 ± 0.176 Bb	7.367 ± 0.819 Bb	11.133 ± 0.267 Ab
40	10.767 ± 0.353 Ba	12.400 ± 0.557 Aa	13.333 ± 0.418 Aa

表 4 连续 3 代幼虫取食含不同 Ni^{2+} 浓度的人工饲料后斜纹夜蛾 6 龄幼虫表皮内的 Ni^{2+} 含量(mg/kg)

Table 4 Ni^{2+} concentration (mg/kg) in the cuticle of the 6th instar larvae of *S. litura* fed on diets with different concentrations of nickel for 3 generations

饲料中 Ni^{2+} 浓度 Nickel doses in diets (mg/kg)	第 1 代 1st generation	第 2 代 2nd generation	第 3 代 3rd generation
0	–	–	–
1	–	–	–
5	–	–	0.467 ± 0.033 c
10	1.100 ± 0.153 Ac	1.230 ± 0.200 Ac	0.967 ± 0.145 Ac
20	3.563 ± 0.293 Ab	4.500 ± 0.700 Ab	5.867 ± 1.049 Ab
40	6.733 ± 0.555 Aa	7.867 ± 0.669 Aa	9.867 ± 0.203 Aa

过量的 Ni^{2+} 可在 6 龄幼虫中肠、脂肪体和表皮中积累(表 2~4),且随饲料中 Ni^{2+} 浓度的增加而增加,并存在显著的剂量-反应关系(第 1,2 和 3 代的剂量-反应回归方程分别为,中肠:$y = 0.6284x + 3.4385$, $R^2 = 0.9757$;$y = 0.684x + 4.3526$, $R^2 = 0.9758$;$y = 0.8447x + 5.4012$, $R^2 = 0.9727$;脂肪体:$y = 0.2622x + 0.5505$, $R^2 = 0.9773$;$y = 0.299x + 0.6569$, $R^2 = 0.9898$;$y = 0.3371x + 1.1904$, $R^2 = 0.907$;表皮:$y = 0.1919x - 0.7458$, $R^2 = 0.9884$;$y = 0.2254x - 0.8261$, $R^2 = 0.9759$;$y = 0.2812x - 0.9809$, $R^2 = 0.9594$)。不同世代中,中肠中的 Ni^{2+} 浓度都显著高于脂肪体中的 Ni^{2+} 浓度,两者中 Ni^{2+} 浓度又都显著高于表皮中的 Ni^{2+} 浓度。

6 龄幼虫血淋巴中的 Ni^{2+} 浓度也随饲料中 Ni^{2+} 浓度的增加而增加(表 5),并存在显著的剂量-反应关系(第 1,2 和 3 代的剂量-反应回归方程分别为:$y = 0.3959x + 3.0403$, $R^2 = 0.9474$;$y = 0.4357x + 3.6373$, $R^2 = 0.9305$;$y = 0.5088x + 3.8382$, $R^2 = 0.9526$)。血淋巴中的 Ni^{2+} 浓度在同一世代不同处理间均存在显著差异,但第 1 代受 1 mg/kg Ni^{2+} 胁迫虫体血淋巴中的 Ni^{2+} 和对照无显著差异。在 10 与 20 mg/kg Ni^{2+} 胁迫下,第 3 代幼虫血淋巴中的 Ni^{2+} 浓度都显著高于第 1 代中的浓度,而取食 Ni^{2+} 浓度为 40 mg/kg 饲料幼虫血淋巴中的 Ni^{2+} 浓度在连续 3 个世代间都存在显著差异性。

表 5 连续 3 代幼虫取食含不同 Ni^{2+} 浓度的人工饲料后斜纹夜蛾 6 龄幼虫血淋巴内的 Ni^{2+} 含量(mg/L)

Table 5 Ni^{2+} concentration (mg/L) in the hemolymph of the 6th instar larvae of *S. litura* fed on diets with different concentrations of nickel for 3 generations

饲料中 Ni^{2+} 浓度 Nickel doses in diets (mg/kg)	第 1 代 1st generation	第 2 代 2nd generation	第 3 代 3rd generation
0	1.533 ± 0.328 Ae	1.533 ± 0.120 Af	1.333 ± 0.145 Af
1	2.333 ± 0.410 Ae	2.967 ± 0.290 Ae	3.967 ± 0.467 Ae
5	6.167 ± 0.145 Ad	6.467 ± 0.426 Ad	7.033 ± 0.333 Ad
10	7.967 ± 0.581 Bc	10.533 ± 0.328 Ac	11.233 ± 0.437 Ac
20	12.667 ± 0.260 Bb	13.767 ± 0.578 ABb	15.167 ± 0.722 Ab
40	1.533 ± 0.328 Ae	1.533 ± 0.120 Af	1.333 ± 0.145 Af

3 讨论

斜纹夜蛾连续 3 个世代取食含过量重金属 Ni^{2+} 的饲料后，大部分 Ni^{2+} 可通过粪便排出体外，粪便中的 Ni^{2+} 远高于其他组织中的含量，表明斜纹夜蛾幼虫可在短期内将食物中过量的 Ni^{2+} 浓缩在粪便中排出体外。然而，排出体内过量的 Ni^{2+} 虽减轻其在斜纹夜蛾幼虫体内的负担，但其是否间接影响分解粪便的其他的真菌、细菌以及其他微生物，而其是否又可通过食物链的传递作用而作用于高等生物也是值得我们进一步探讨的问题。

斜纹夜蛾幼虫也能吸收食物中部分 Ni^{2+}，并将其储存在中肠、脂肪体和表皮等具消化和分泌功能的组织中，不同组织中所积累的 Ni^{2+} 含量为中肠 > 脂肪体 > 表皮，且积累量随胁迫时间和食物中 Ni^{2+} 剂量的增加而增加，此结果与重金属在土壤、水生以及一些植食性昆虫相应部位的积累存在相似性（孙虹霞等，2007）。然而，过量 Zn^{2+} 在斜纹夜蛾 6 龄幼虫不同组织中积累情况为中肠 > 表皮 > 脂肪体（舒迎花，2006），此种差异可能与不同重金属的特性、生理功能以及斜纹夜蛾幼虫对不同金属离子的调节能力有一定的联系；此外，荨麻蛱蝶 *Aglais urticae* L. 对重金属 Cd，Pb 和 Cu 也有不同的调节方式（Lindqvist，1994）。

中肠在离子调节和矿物质吸收方面有重要作用，其柱形细胞内的金属颗粒可沉积胞内过量金属离子，使细胞免受重金属的毒害作用；同时，中肠细胞的溶酶体也可沉淀大量的金属离子（Ballen-Dufrancais，2002）。本文的研究结果表明，过量的 Ni^{2+} 主要积累在斜纹夜蛾幼虫中肠，中肠对 Ni^{2+} 起主要的阻碍作用，但过量的 Ni^{2+} 以何种形式沉积在中肠细胞中还有待于进一步研究。

过量的 Ni^{2+} 还可通过中肠上皮细胞基底膜并经由血淋巴的转运作用积累在脂肪体和表皮等具有储存和分泌功能的组织中，故在血淋巴中也检测到过量 Ni^{2+} 的存在，并随胁迫浓度的增加以及胁迫世代数的延长而增加。

积累在血淋巴中的高浓度 Ni^{2+} 可抑制 6 龄幼虫血细胞的凋亡，并降低幼虫血淋巴中能源物质的含量（未发表数据），从而表明 Ni^{2+} 对血淋巴的功能造成了危害。类似研究也表明，过量的 Zn^{2+} 可诱导斜纹夜蛾幼虫血细胞的凋亡（Xia *et al.*，2005），并可间接影响其幼虫血液寄生蜂——双斑侧沟茧蜂 *Microplitis bicoloratus*（Chen）的寄生率、发育历期和羽化率等（夏嫱等，2006）。然而，在对照虫体中也检测到 Ni^{2+} 的存在，其在斜纹夜蛾发育中的作用还有待于进一步的确定。

此外，在同一处理中，Ni^{2+} 在不同组织中的积累量也随胁迫世代数的增加而增加。重金属对不同世代植食性昆虫的影响还未见报道，但重金属胁迫时间的延长可降低弹尾目昆虫 *Folsomia candida*（Willem）的孵化率（Crouau *et al.*，1999）以及增加豌豆蚜 *Acyrthosiphon pisum*（Harris）的死亡率（Laskowski，2001）。因此，胁迫世代数的增加可能影响了斜纹夜蛾幼虫对重金属 Ni^{2+} 的耐受性，从而积累在幼虫体内的 Ni^{2+} 含量也有所提高。

结果表明，食物中过量的 Ni^{2+} 可在斜纹夜蛾中肠等组织中积累，而过量 Ni^{2+} 对其生长发育、组织结构的影响以及斜纹夜蛾对过量重金属 Ni^{2+} 的解毒等都有待于一步的研究；而粪便中的过量 Ni^{2+} 对生态系统的二次污染也需引起注意。同时，在野外条件下，重金属 Ni^{2+} 对斜纹夜蛾的影响是否存在类似的规律也有待于进一步探讨。

参考文献（References）

Bagatto G，Shorthouse JD，1996. Accumulation of Cu and Ni in successive stages of *Lymantria dispar* L.（Lymantriidae，Lepidoptera）near ore smelters，at Sudbury，Ontario，Canada. *Environ. Pollut.*，92：7 – 12.

Ballen-Dufrancais C，2002. Localization of metals in cells of pterygote insects. *Micros. Res. Tech.*，56：403 – 420.

Crouau Y，Chenon P，Gisclard C，1999. The use of *Folsomia candida*（Collembola，Isotomidae）for the bioassay of xenobiotic substanes and soil pollutants. *Appl. Soil Ecol.*，12：103 – 111.

Garrido S，Del Campo GM，Esteller MV，Vaca R，Lugo J，2005. Heavy metals in soil treated with sewage sludge composting，their effects on yield and uptake of broad bean seeds（*Vicia faba* L.）. *Water Air Soil Pollut.*，166：303 – 319.

Hopkin SP，1990. Critical concentrations，pathways of detoxification and cellular ecotoxicology of metals in terrestrial arthropods. *Func. Ecol.*，4：321 – 327.

Khan S，Nugegoda D，2003. Australian freshwater crayfish *Cherax destructor* accumulates and depurates nickel. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*，70(2)：308 – 314.

Kozlov MV，Haukioja E，Kovnatsky EF，2000. Uptake and excretion of nickel and copper by leaf-mining larvae of *Eriocrania semipurpurella*（Lepidoptera：Eriocraniidae）feeding on contaminated birch foliage. *Environ. Pollut.*，108：303 – 310.

Laskowski R，2001. Why short-term bioassays are not meaningful：Effects of a pesticide（Imidacloprid）and a metal（cadmium）on pea aphids（*Acyrthosiphon pisum* Harris）. *Ecotoxicology*，10：177 – 183.

Li JR，Li XP，Wang L，Duan QY，2007. Advances in uptake，transportation and bioaccumulation of heavy metal ions in bivalves. *Fisheries Sci*.，26(1)：51－55. [励建荣，李学鹏，王丽，段青源，2007. 贝类对重金属的吸收转运与累积规律研究进展. 水产科学，26(1)：51－55]

Li LK，Yang XQ，Hao SX，Diao SQ，Shi H，Wu XX，Zhou WJ，Li LD，Chen PJ，2006. A study of heavy metal enrichment in *Oreochromis niloticus* and *Litopeneaus vannamei*. *J. Trop. Oceanogr*.，25(4)：61－65. [李来好，杨贤庆，郝淑贤，刁石强，石红，吴燕燕，周婉君，李刘冬，陈培基，2006. 罗非鱼、南美白对虾对重金属富集的研究. 热带海洋学报，25(4)：61－65]

Lindqvist L，1994. Metal uptake and accumulation during growth of *Aglais urticae* (Lepidoptera：Nymphalidae) larvae. *Environ. Entomol*.，23：975－978.

Liu DC，Shao CM，2007. Assessment of contents of heavy metals in fish body and its regular distributed pattern. *China Meas. Technol*.，33(4)：121－122. [刘丹赤，邵长明，2007. 鱼体内重金属含量测定及其分布状况的研究. 中国测试技术，2007，33(4)：121－122]

Pane EF，McDonald MD，Curry HN，Blanchard J，Wood CM，Grosell M，2006. Hydromineral balance in the marine gulf toadfish (*Opsanus beta*) exposed to waterborne or infused nickel. *Aquat. Toxicol*.，80(1)：70－81.

SAS Institute Inc，1989. SAS/STAT User's Guide. Ver. 6，4th ed.，Vol. 1 and 2. SAS Institute Inc，Cary，NC.

Schofield RM，Postlethwait JH，Lefevre HW，1997. MeV-ion microprobe analyses of whole *Drosophila* suggest that zinc and copper accumulation is regulated storage not deposit excretion. *J. Exp. Biol*.，200：3 235－3 243.

Shu YH，2005. Primary studies on effects of heavy metal Zn^{2+} on *Spodoptera litura* Fabricius larvae (Lepidoptera：Noctuidae). MSc Dissertation，Sun Yat-sen University，Guangzhou. [舒迎花，2005. 重金属 Zn^{2+} 胁迫对斜纹夜蛾幼虫影响的初步研究. 广州：中山大学硕士论文]

Sun HX，Liu Y，Zhan GR，2007. Effects of heavy metals pollution on insect development. *Acta Entomol. Sin*.，50(2)：178－185. [孙虹霞，刘颖，张古忍，2007. 重金属胁迫对昆虫生长发育的影响. 昆虫学报，50(2)：178－185]

Tochimoto H，Maki T，Afzal M，Tanabe S，2003. Accumulation of trace metals in aquatic insect *Stenopsyche marmorata* Navas transferred in streams. *Ecotoxicol. Environ. Saf*.，56：256－264.

Türkmen M，Türkmen A，Akyurt I，Tepe Y，2005. Limpet，*Patella caerulea* Linnaeus，1758 and barnacle，*Balanus* sp.，as biomonitors of trace metal availabilities in Iskenderun Bay，Northern East Mediterranean Sea. *Bull. Environ. Contam. Toxicol*.，74：301－307.

Xia Q，Hu XJ，Shu YH，Sun HX，Zhang GR，2006. Survival of *Microplitis bicoloratus* Chen on larvae of *Spodoptera litura* Fabricius stressed by heavy metal zinc. *Acta Entomol. Sin*.，49(3)：387－392. [夏嫱，胡新军，舒迎花，孙虹霞，张古忍，2006. 在受重金属 Zn^{2+} 胁迫的斜纹夜蛾幼虫寄主上双斑侧沟茧蜂的生存和发育. 昆虫学报，49(3)：387－392]

Xia Q，Sun HX，Hu XJ，Shu YH，Gu DX，Zhang GR，2005. Apoptosis of *Spodoptera litura* larval hemocytes induced by heavy metal zinc. *Chinese Science Bulletin*，50(23)：2 613－2 606.

Zvereva E，Serebrov V，Glupov V，Dubovskiy I，2003. Activity and heavy metal resistance of non-specific esterases in leaf beetle *Chrysomela lapponica* from polluted and unpolluted habitats. *Comp. Biochem. Physiol. C Toxicol. Pharmacol*.，135C：383－391.

（责任编辑：袁德成）